



Electrostimulation et Renforcement Musculaire

Antoine COUTURIER

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

Introduction

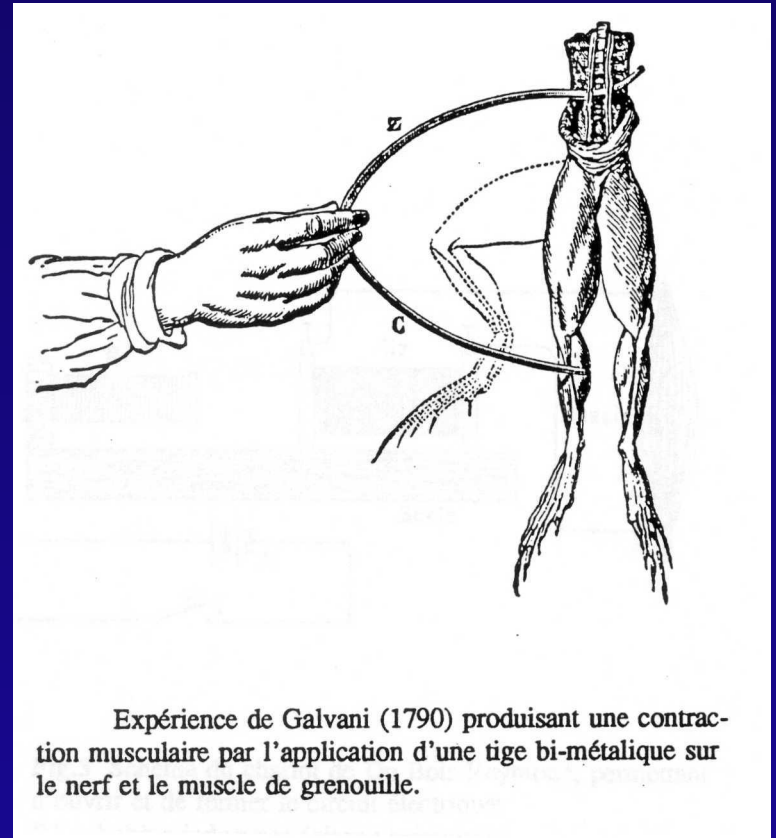
- ✱ Historique
- ✱ Principes de fonctionnement
 - excitabilité des unités motrices
 - effet des différents paramètres de stimulation
- ✱ Entraînement de la force
- ✱ Processus adaptatifs
- ✱ Coût énergétique
- ✱ Entraînement en endurance
- ✱ Récupération
- ✱ Rééducation post-traumatique

Les "avantages" de l'électrostimulation

- ✱ L'électrostimulation permet de recruter préférentiellement les fibres de type II
- ✱ Les fréquences faibles (20 Hz) permettent de recruter les fibres lentes
- ✱ Les fréquences élevées (80 Hz) permettent de recruter les fibres rapides
- ✱ Puisque l'électrostimulation shunte la commande nerveuse, l'entraînement par électrostimulation permet d'hypertrophier directement le muscle

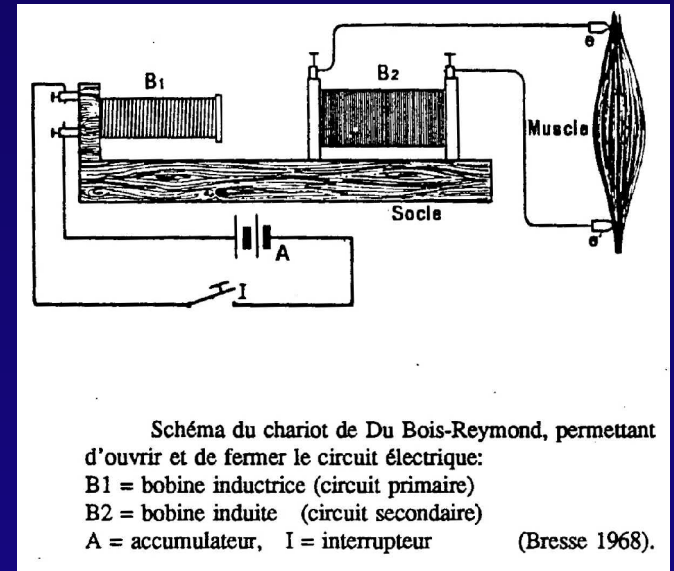
Historique

- ✱ 18e siècle: découverte du contrôle externe et artificiel de la contraction musculaire par Luigi Galvani, sur les muscles de grenouille



Historique

- ✱ Du Bois Reymond (1818-1896) démontre que pour exciter un muscle, un courant électrique variable est préférable au courant continu



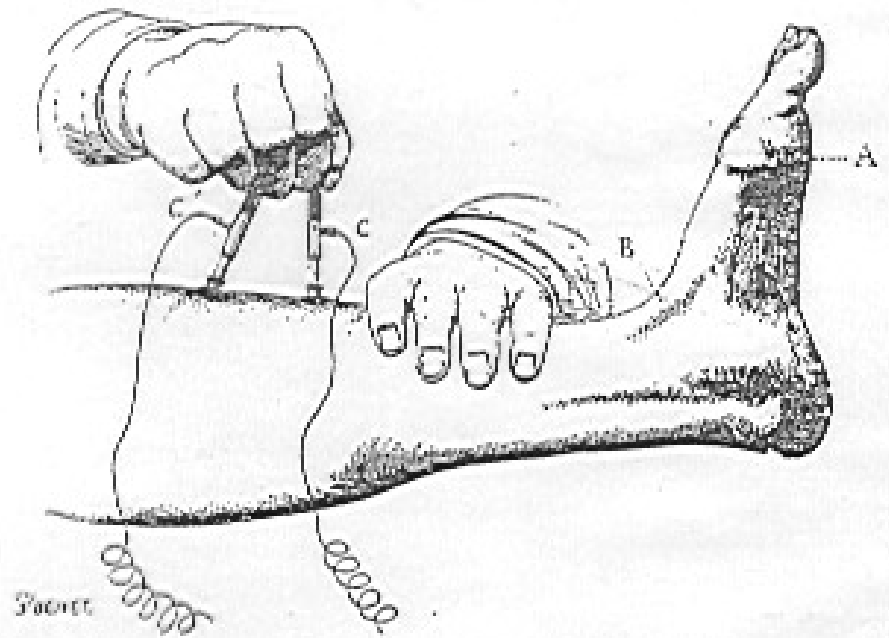
- ✱ Utilisation à grande échelle de l'électrostimulation des extrémités chez l'humain, par Duchenne de Boulogne (1867)
- ✱ Utilisation dans la pratique sportive à partir de 1970 (Zruback) et 1971 (Kotz)

Principe

- ✱ On provoque une contraction musculaire à partir d'une stimulation exogène



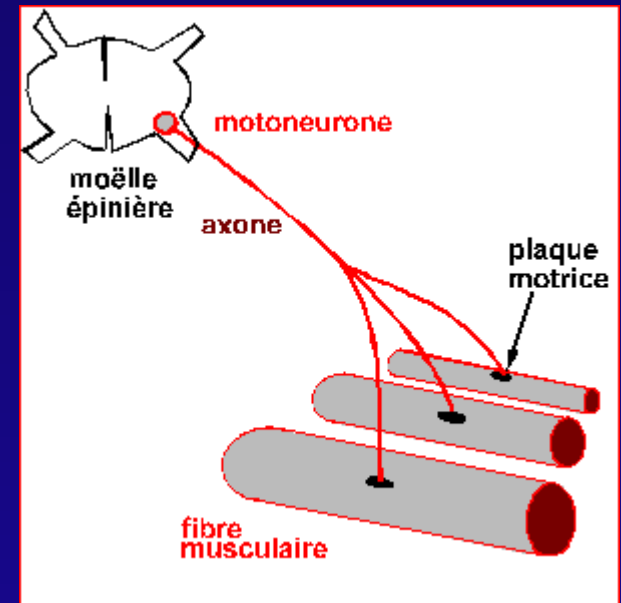
G. B. Duchenne, father of medical electrophysiology



Duchenne's illustration of electrical stimulation of muscles

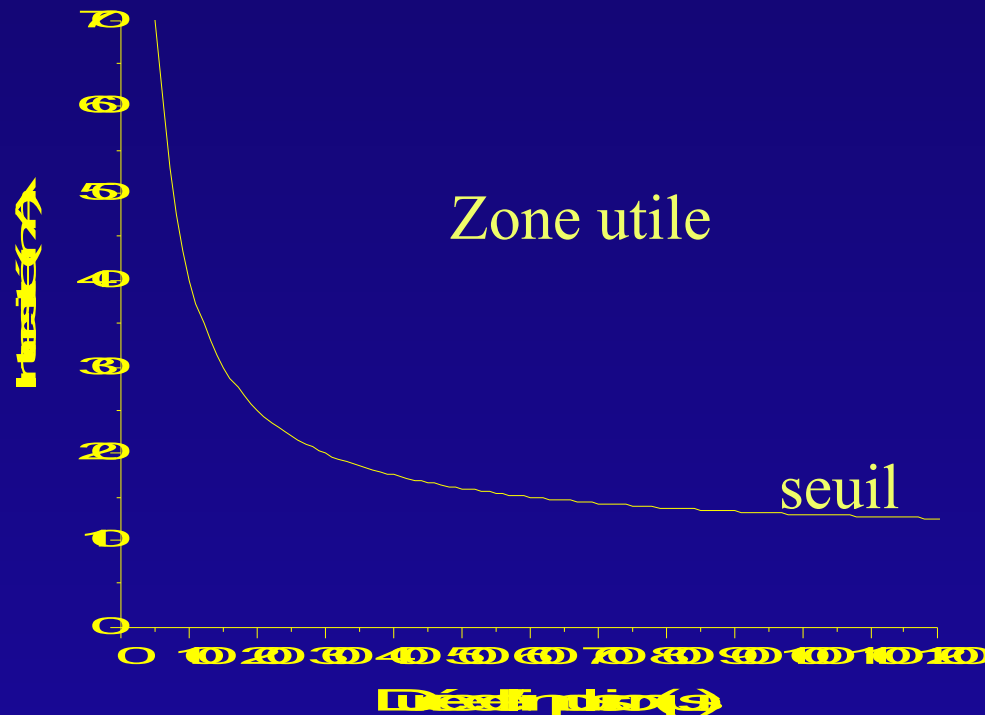
Principe

- ✱ En condition naturelle, le SNC élabore la commande nerveuse, qui se propage le long du motoneurone jusqu'à la plaque motrice, puis le long des cellules musculaires.
- ✱ En stimulation électrique neuromusculaire, on court-circuite la commande et on excite directement le nerf, plus excitable que les cellules musculaires.



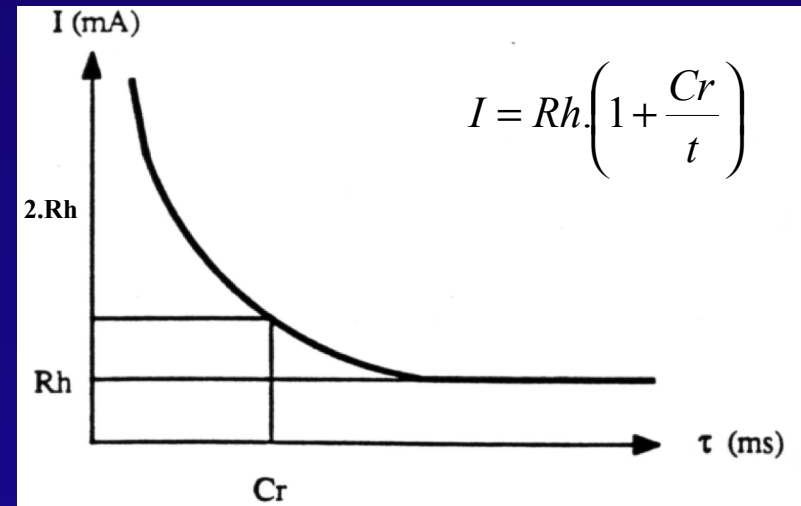
Excitabilité

- ✱ Il existe une relation entre l'intensité et la durée minimale d'application du courant pour obtenir une réponse.

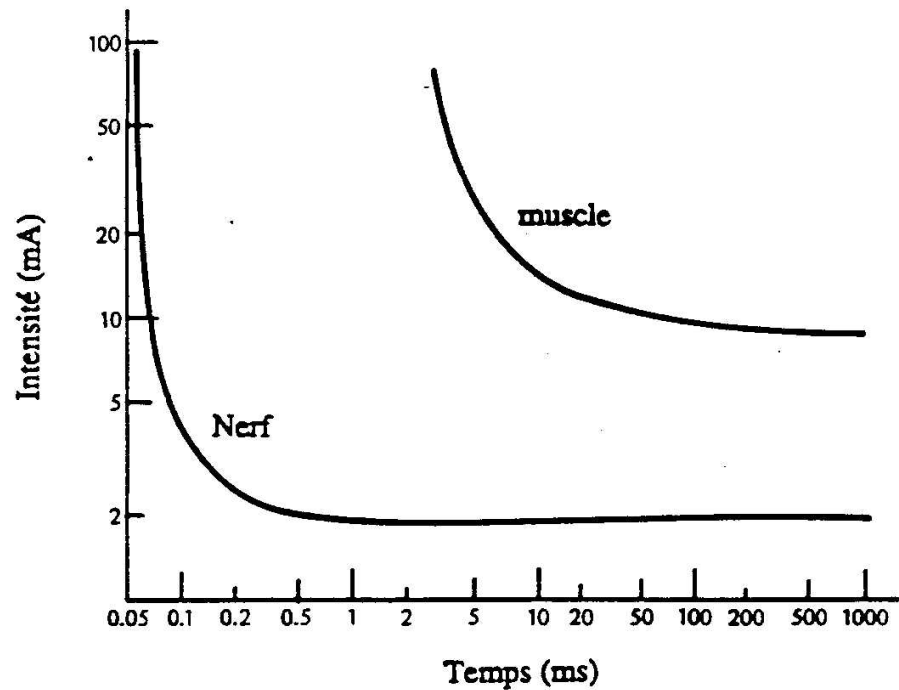


Excitabilité. Relation Intensité-Durée

- ✿ La rhéobase est l'intensité du courant au dessous de laquelle la stimulation électrique n'est jamais efficace
- ✿ La chronaxie se définit comme le temps d'application nécessaire d'une stimulation d'intensité double de la rhéobase pour obtenir un potentiel d'action.
- ✿ La chronaxie est représentative de l'excitabilité de la fibre nerveuse.



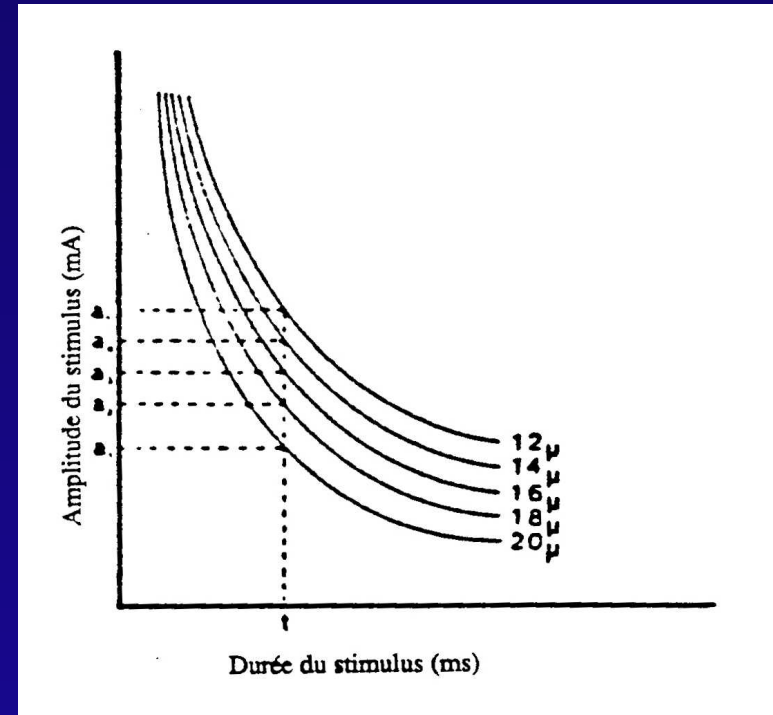
Excitabilité des nerfs et des muscles



Courbe d'intensité-durée pour le nerf et le muscle
(d'après Cummings 1987).

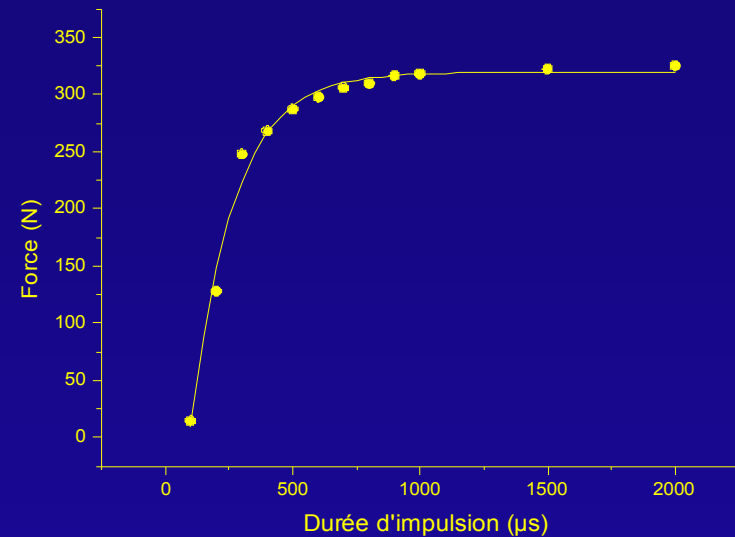
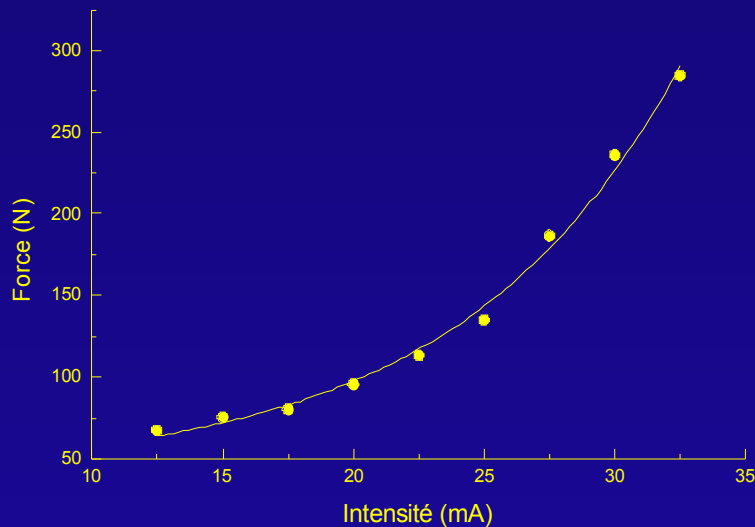
Excitabilité des différentes unités motrices

- ✱ L'excitabilité d'une fibre nerveuse est directement proportionnelle à son diamètre
- ✱ Les unités motrices de type lente ont des fibres nerveuses de petit diamètre
- ✱ Les unités motrices de type rapide ont des fibres nerveuses de gros diamètre



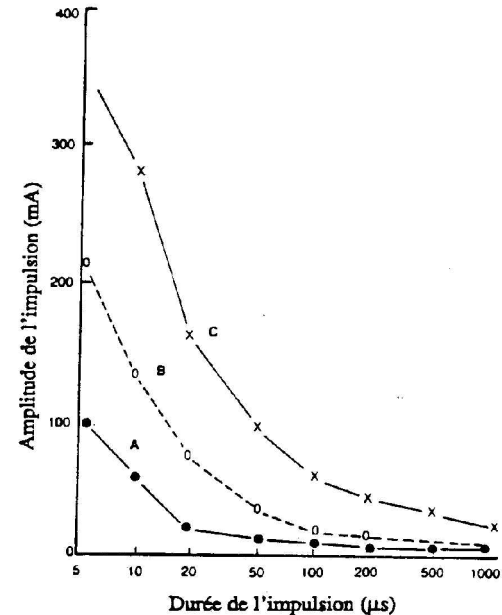
Relations Force-Intensité-Durée

- ☼ Relation de type exponentielle ou sigmoïdale.
- ☼ Plateau quand toutes les UMs potentiellement recrutables sont recrutées.



Choix de l'intensité et de la durée des impulsions

- ✿ Pour un même degré de recrutement:
 - intensité faible, durée élevée: sensations désagréables de piqûres et brûlures.
 - Intensité élevée, durée courte: courant non douloureux.



Courbe intensité-durée d'impulsion pour le déclenchement d'une réponse excitatrice sensitive (A), motrice (B) et douloureuse (C) (Alon 1987).

- ✿ Cette dernière combinaison n'est cependant pas souhaitable

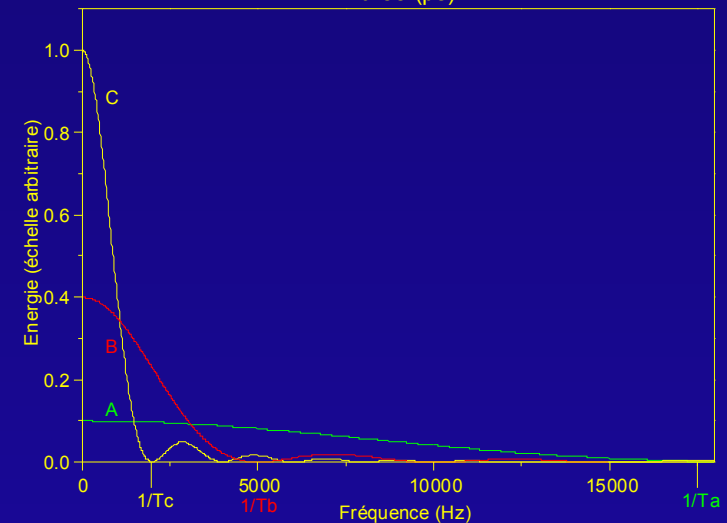
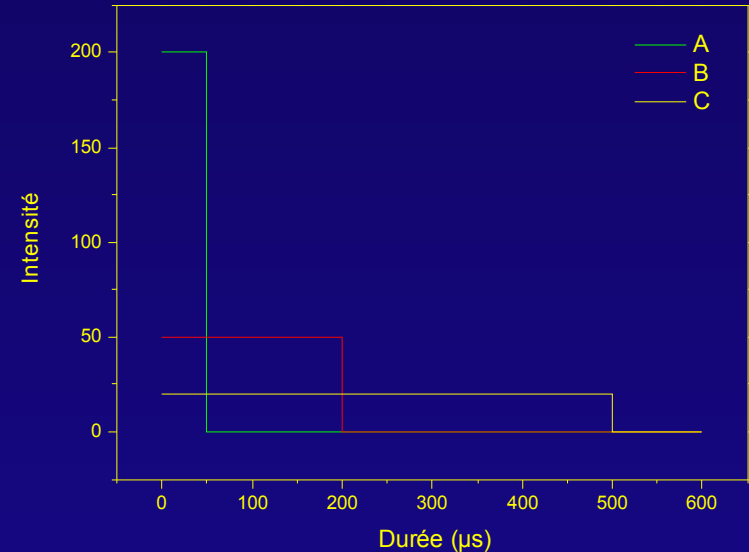
Choix de l'intensité et de la durée des impulsions

✿ Raisons technologiques:

Il est plus facile de réaliser une impulsion faible et longue qu'intense et courte.

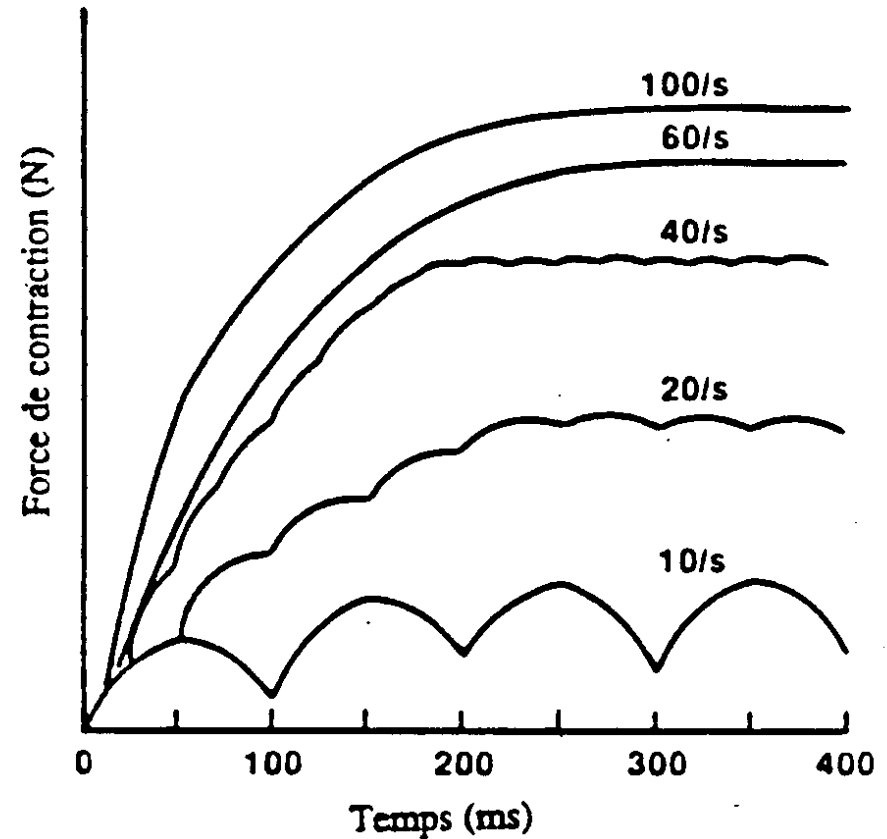
✿ Raisons physiologiques:

Les tissus ont une fonction de filtre passe-bas. Les impulsions sont d'autant mieux transmises qu'elles sont longues.



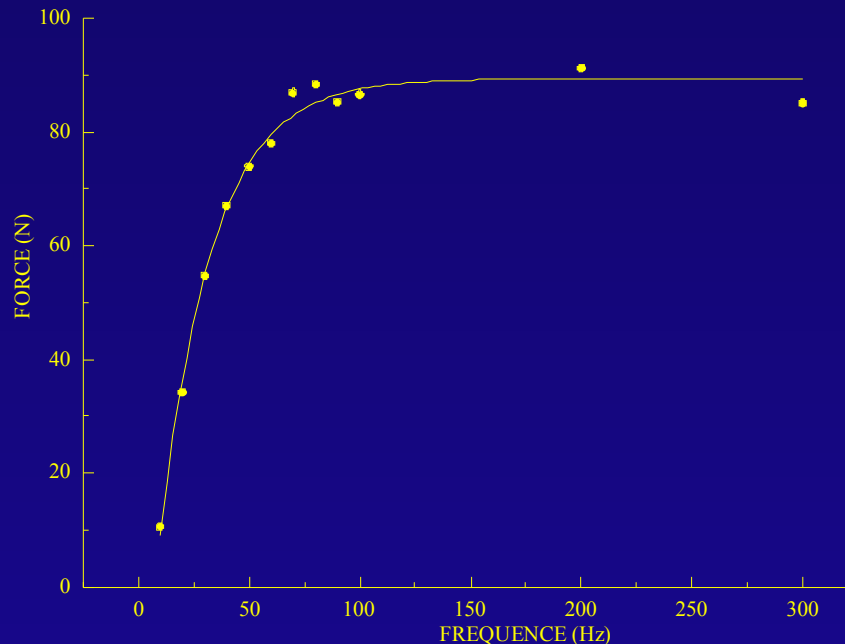
Effet de la fréquence

- ✱ Twitch (secousse) à partir d'une impulsion unique
- ✱ Sommation des secousses si les impulsions sont envoyées avant la relaxation du muscle
- ✱ Sommation temporelle



Relation Force-Fréquence

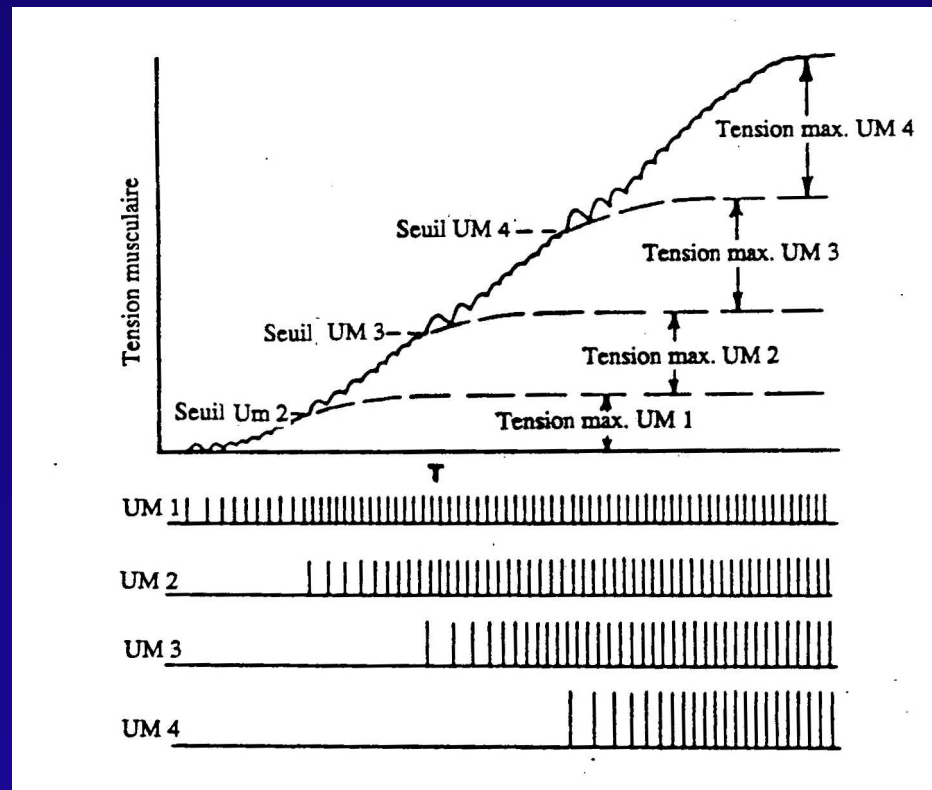
- ☼ Sommation des secousses, jusqu'à l'obtention d'un téτανos complet.



- ☼ La fréquence de fusion téτανique est fonction du type d'unité motrice recruté.
- ☼ Elle est de l'ordre de 30 Hz des UM lentes, 80 Hz pour des rapides.
- ☼ La fréquence n'influence que le degré de fusion téτανique

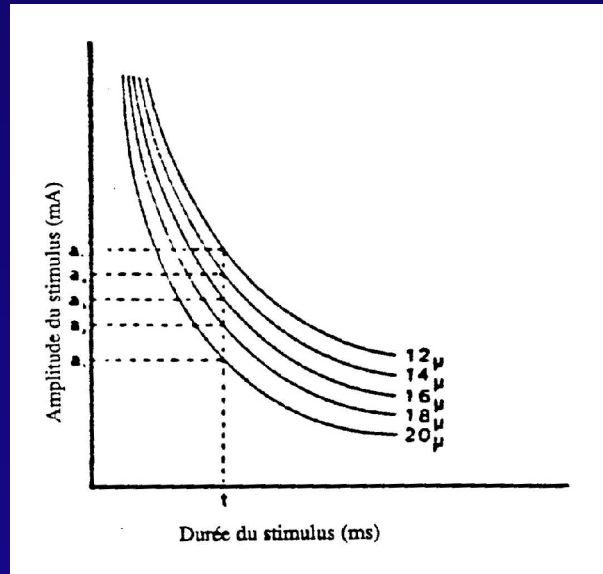
Recrutement des différents types de fibres

- ✱ Lors de CV, recrutement d'UM type lentes, puis rapides.



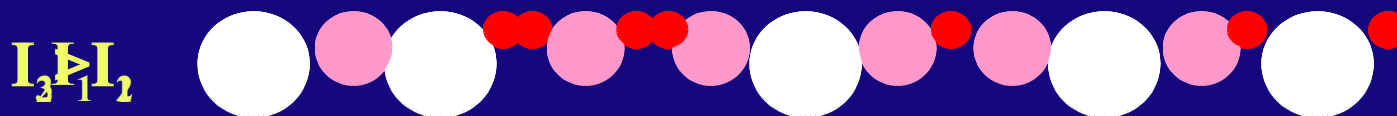
Recrutement des différents types de fibres

- ✿ Les UM de type II étant plus excitables, la stimulation électrique inverse-t-elle l'ordre de recrutement ?

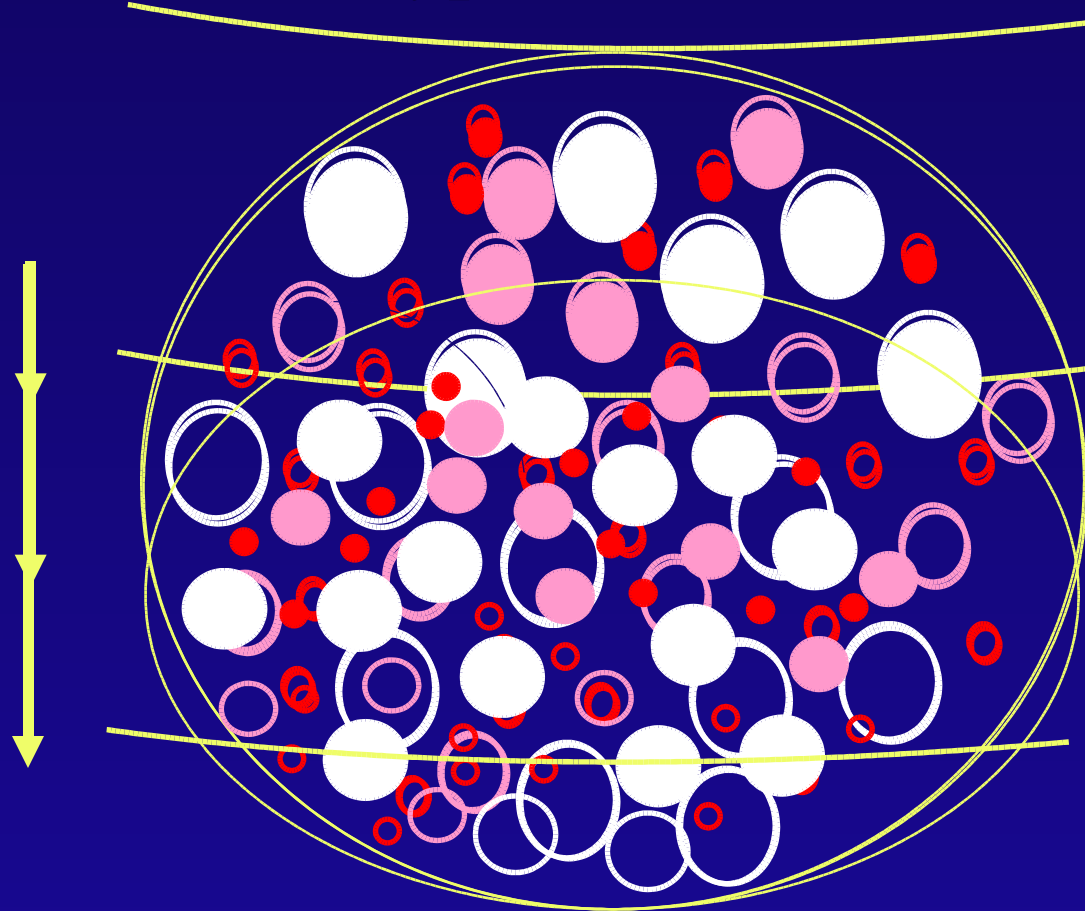


- ✿ Estimation par les caractéristiques de la secousse.
- ✿ Estimation par la fréquence de fusion tétanique.
- ✿ Estimation par la vitesse de conduction.
- ✿ Estimation par le coût énergétique des contractions

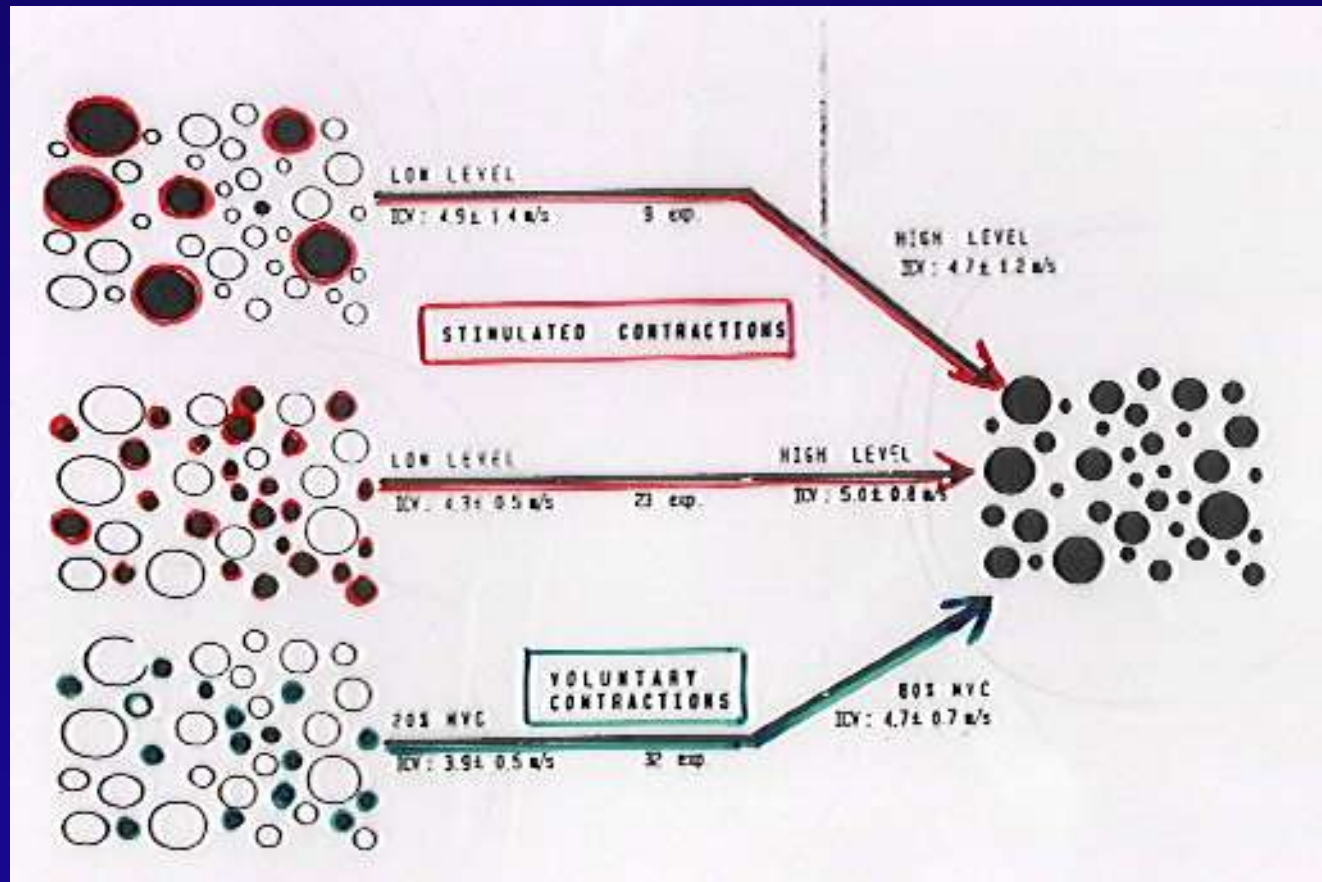
Recrutement « théorique »



Recrutement des différents types de fibre



Recrutement des différents types de fibres



Knaflitz et al (1990)

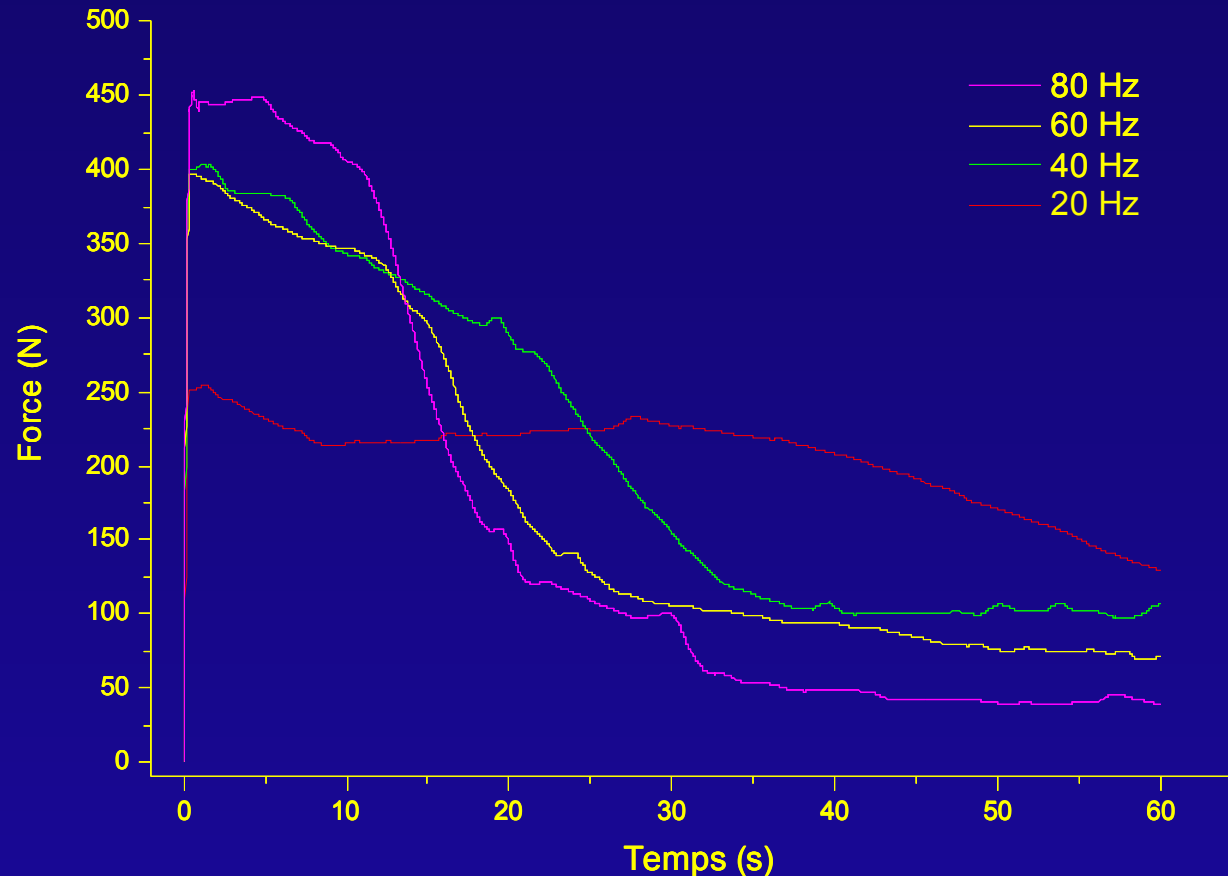
Recrutement des différents types de fibres

- ✱ Feiereisen 97 (Duchateau)
- ✱ Mesure de l'activation de 302 UM
 - contraction volontaire ou électro-induite
 - de 1% à 88% MVC
- ✱ Contraction volontaire: ordre de grandeur pour 94 % des cas
- ✱ Contraction électro-induite: ordre inverse dans ~ 30 % des cas

Recrutement des différents types de fibres

- ✱ Quand on augmente l'intensité ou la durée des impulsions, le recrutement dépend surtout de la disposition des fibres nerveuse à l'intérieur du nerf.
- ✱ Recrutement aléatoire et non prédictible, différent de celui observé en CV.

Electrostimulation en régime continu: effet de la fréquence:



Fatigue électro-induite et fréquence de stimulation

- ✱ Fatigue de type haute fréquence (80 Hz):
 - Fréquence de décharge non physiologique.
 - Périodes trop courtes pour que les échanges Na^+/K^+ puissent se faire.
 - Récupération lente à court terme, rapide à long terme.

- ✱ Fatigue de type basse fréquence (20 Hz):
 - Fatigue au niveau du couplage excitation-contraction.
 - Récupération rapide à court terme, lente à long terme

Choix des paramètres de stimulation

- ✱ Intensité et durée d'impulsion maximale.
 - Durée d'impulsion $> 200 \mu s$
- ✱ Adaptation de fréquence de stimulation.
- ✱ Adaptation du temps de contraction.
- ✱ Adaptation du temps de récupération.

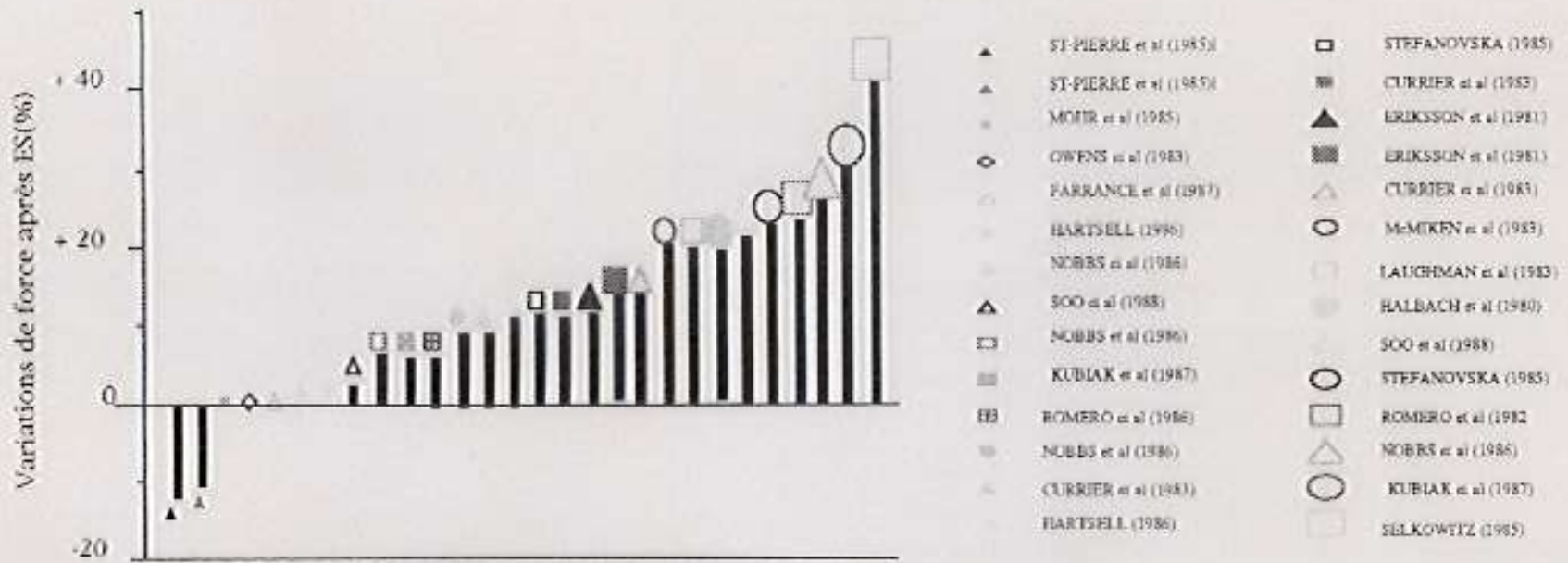
Différences entre contraction volontaire et électro-induite

- ✻ Rôle du SNC
- ✻ Activation asynchrone/synchrone des UMs
- ✻ Fréquence de décharge des motoneurones variable/constante
- ✻ Rotation des UMs avec la fatigue
- ✻ Ordre de recrutement des UMs

Electrostimulation et entraînement de la force

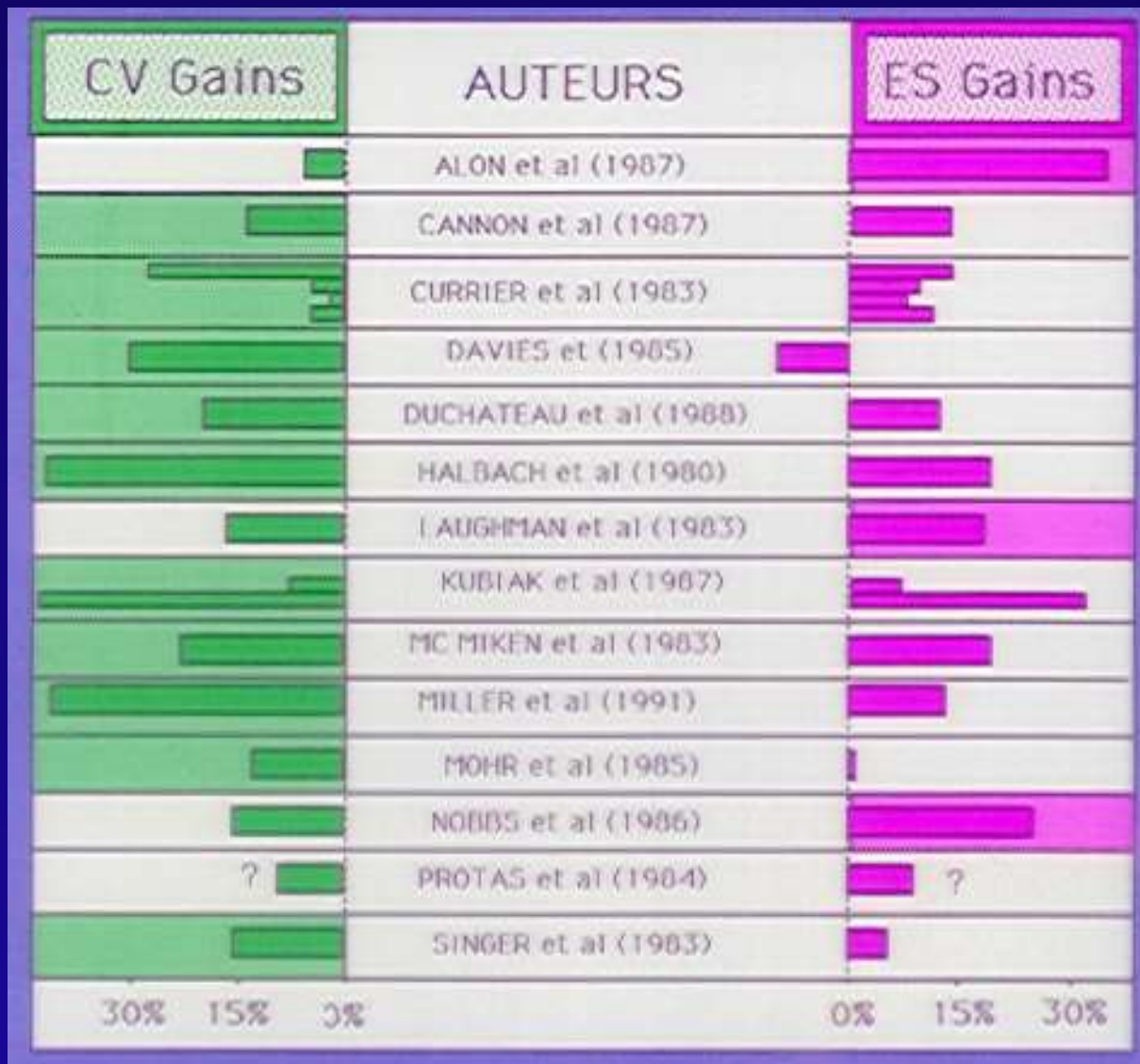
- ✱ Efficacité de cette technique ?
- ✱ Comparaison avec l'entraînement par CV
 - Amélioration de la force
 - Comparaison des gains
 - Rentabilité de l'entraînement
 - Processus adaptatifs
 - Nature (neurologique ou musculaire)
 - Entraînement à l'endurance

Efficacité de la technique



- ✱ Grande variabilité des gains
- ✱ Reflet de la variabilité des protocoles d'entraînement et des techniques utilisées.

Comparaison ES vs. CV



Comparaison ES vs. CV

- ✱ Avantage pour l'entraînement par contraction volontaire
- ✱ De plus, on peut émettre des réserves dans les cas de gains plus importants avec l'électrostimulation
 - Alon et al.: le groupe témoin a progressé le plus
 - Laughman et al.: entraînement combiné ES + CV

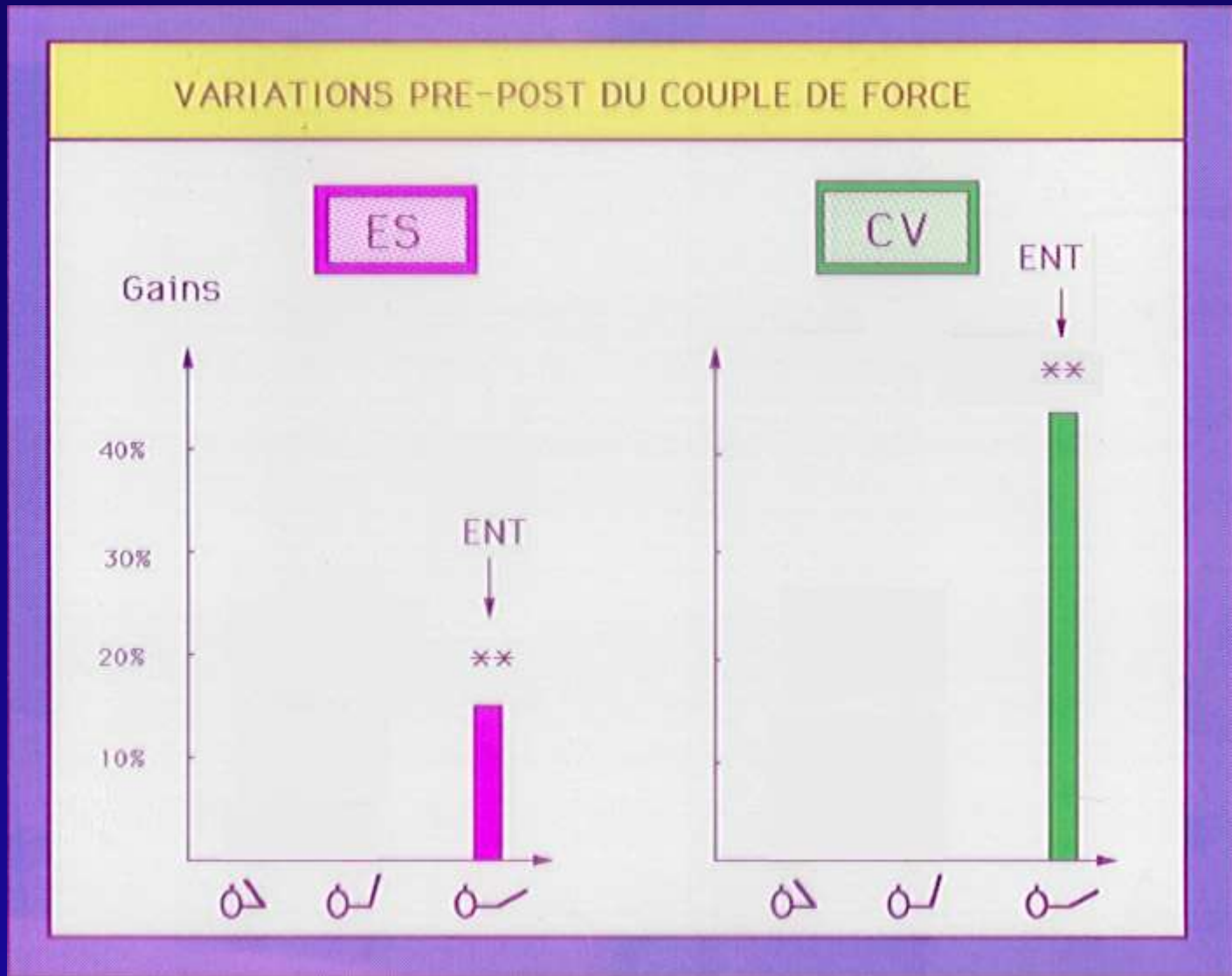
Entraînement de la force

- ✱ Entraînement sur 5 semaines
- ✱ 5 contractions isométriques de 5s - 25 s de repos
- ✱ 5 séries séparées d '1 min de repos
- ✱ Groupe contractions volontaires: 80% MVC
- ✱ Groupe électrostimulé: intensité maximale supportable

Miller et al (1991)



Comparaison des gains Es vs. CV



Groupe électro-stimulé

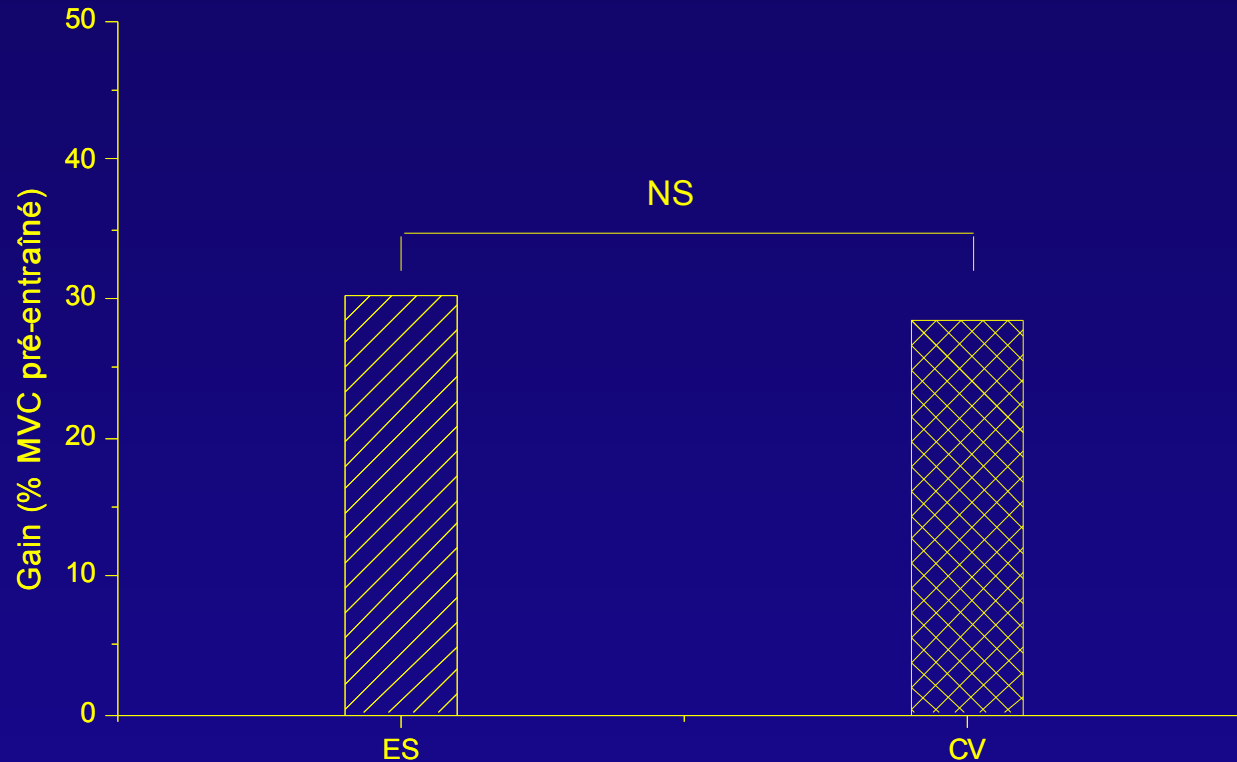
- ✱ Gains très hétérogènes: de 0 à 50 %
- ✱ Les gains les plus importants correspondent à ceux qui avaient la force électro-induite la plus importante
 - Phénomène similaire observé en entraînement volontaire
- ✱ Adaptation à l'électrostimulation au cours des séances



Rentabilité de l'entraînement

- ✱ Il est difficile de comparer un groupe s'entraînant à 10 % de MVC avec un autre à 80 % MVC
- ✱ On fait s'entraîner le groupe volontaire au même pourcentage de MVC que le groupe électrostimulé

Rentabilité de l'entraînement

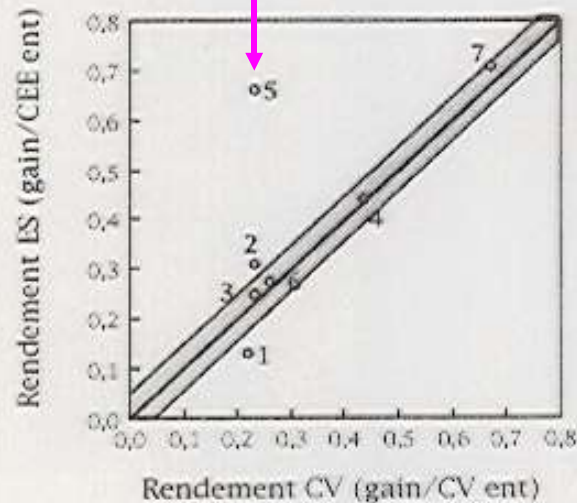


$$\text{Rendement} = \frac{\text{Gain}}{\text{couple d'entraînement}}$$

	71 %	67 %
	(30.3/42.7)	(28.5/42.7)

Rentabilité de l'entraînement

Entraînement CV + ES



$$\text{Rendement} = \frac{\text{gain de force}}{\text{intensité de contraction à l'entraînement}}$$

1 - Duchateau et al (1988)

2 - Caggiano et al (1994)

3 - Carrier et al (1983)

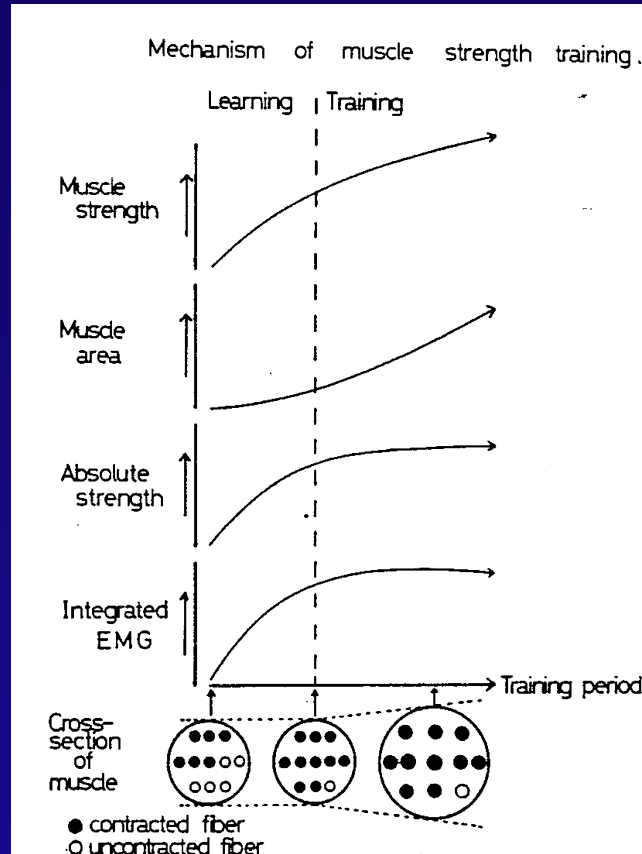
4 - Kubiak et al (1977)

5 - Laughman et al (1983)

6 - Mac Miken et al (1983)

7 - Miller et al (1990)

Processus adaptatifs

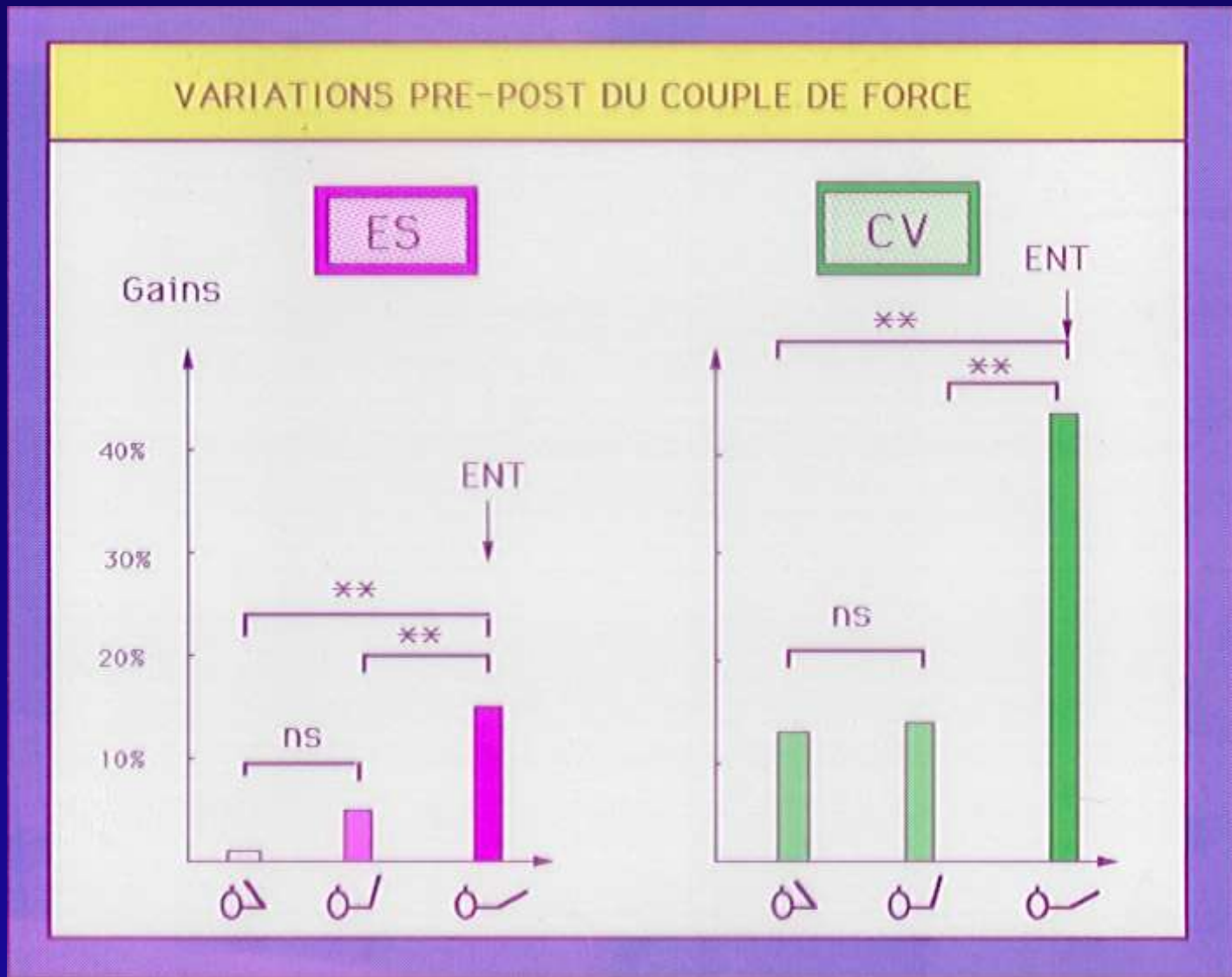


- ✱ En shuntant la commande nerveuse, l'électrostimulation permet l'hypertrophie du muscle beaucoup plus rapidement qu'en entraînement volontaire ??

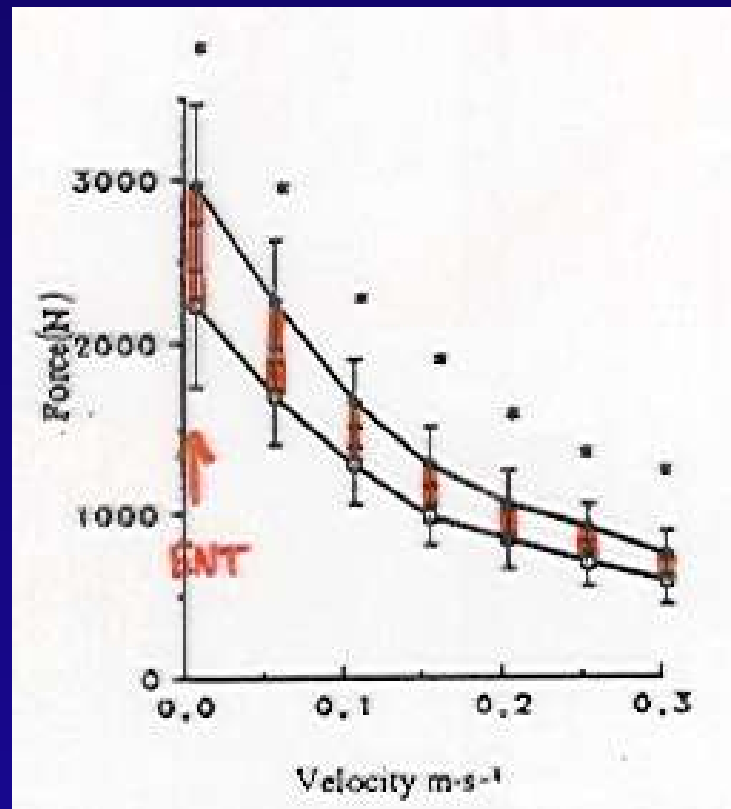
Les témoins des adaptations nerveuses

- ✱ Spécificité de l'angle
 - le gain de force le plus important s'observe à l'angle d'entraînement
- ✱ Spécificité de la vitesse
 - le gain de force le plus important s'observe à la vitesse d'entraînement
- ✱ Effet controlatéral
 - gain de force du membre controlatéral non entraîné
- ✱ Gain de force sans hypertrophie
- ✱ Modification du tracé EMG

Spécificité de l'angle

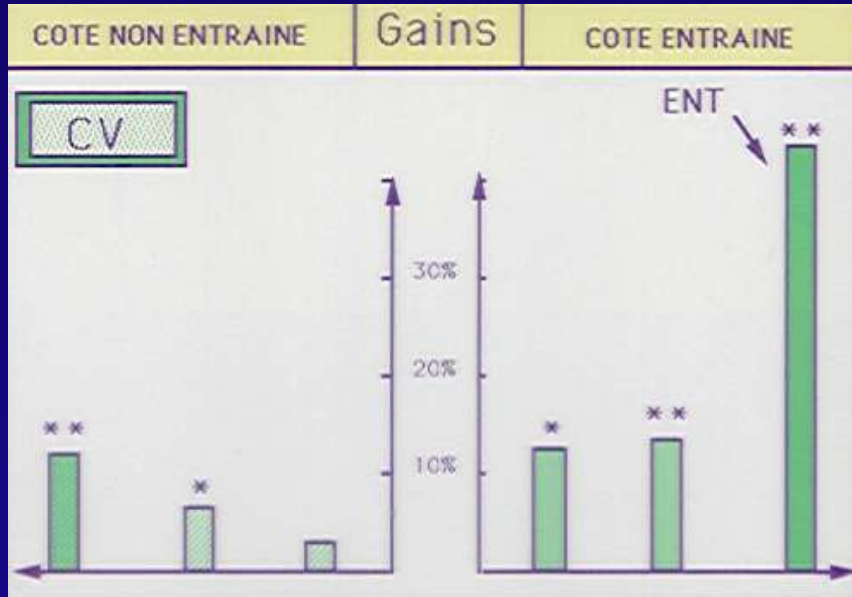


Spécificité de la vitesse d'entraînement



Martin et coll. (1993)

Gain controlatéral



Miller et al. 91

- ✱ Résultats similaires pour Cabric et al. (87), Lai et al. (88)

Effet sur la masse musculaire

Auteurs	Muscle	Gain de masse %	Gain de force	Nombre de séances
Halbach et al. (80)	Quadriceps	Aucun	22	15
Eriksson et al (81)	Quadriceps	Aucun	14 – 18	15
Cheremisin (83)	Divers muscles	1-1.5 cm	16-23	30
Anzil et al. (74)	Quadriceps	6.7	?	52

Modifications du tracé EMG

* Colson et al. (00)

- Entraînement du biceps brachii de 9 sujets
- 6 fois 6 s de contraction (70% MVC), 5 séries/j, tous les jours pendant 7 semaines

* Maffiuletti et al. (02)

- Entraînement du fléchisseur du pied de 8 sujets
- 16 session, sur 4 semaines

- * L 'augmentation de la force s 'accompagne d 'une augmentation de l 'EMG

Modification des caractéristiques musculaires

- ✱ Perez et al. (02)
- ✱ Entraînement sur les quadriceps de 15 sujets
- ✱ 45-60 Hz, 12s-8s, 30 min/j, 3j/sem, 6 semaines
- ✱ Biopsies et exercice test avant-après
- ✱ Augmentation du nombre de IIa et diminution des I et IIb
 - Transformation I, IIb → IIa
- ✱ Augmentation des capacités oxydatives des IIa
- ✱ Pas d'hypertrophie

Résultats similaires à un entraînement volontaire

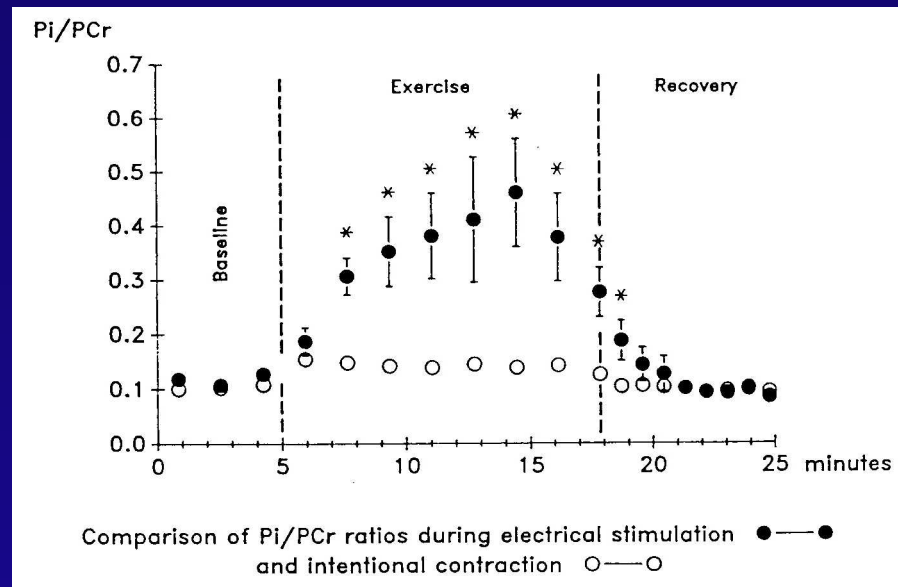
Modification des caractéristiques musculaires

- ✱ Chan (99)
- ✱ Entraînement HF de 6 UM de l 'adducteur du pouce, sur 2 sujets
- ✱ ST: Augmentation Fmax et twitch, résistance à la fatigue inchangée
- ✱ FT: Diminution Fmax et twitch, résistance à la fatigue augmente

Résultats similaires à un entraînement volontaire

Coût énergétique

- ✿ Vanderthommen et al. (99)
- ✿ 64 contractions 5.5s-5.5s à 20 % MVC, ES ou vol.



- ✿ Pi/PCr plus élevé pour l'ES, indiquant une sollicitation anaérobie plus importante
- ✿ Recrutement préférentiel des fibres de type II ??

Coût énergétique

- ✱ Ratkevicius et al. (98)
- ✱ Mesure de la resynthèse anaérobie de 1 'ATP
- ✱ Contractions volontaires ou électro-induites
- ✱ Contractions à 40 % et 75 % MVC
- ✱ A 40 % MVC, coût anaérobie supérieur pour les contractions électro-induites
- ✱ A 75 % MVC, coût anaérobie équivalent entre contractions volontaires ou électro-induites

Entraînement à l'endurance

- ✱ Stimulation basse fréquence de longue durée
- ✱ Technique efficace chez l'animal en stimulation chronique
 - Modifications des caractéristiques musculaires fonctionnelles
 - Modifications des caractéristiques musculaires métaboliques
 - Modifications des caractéristiques musculaires histochimiques
 - Résistance accrue à la fatigue
- ✱ De telles adaptations peuvent-elles se retrouver chez l'homme ?

Entraînement à l'endurance

Auteurs	Stim.	Entraînement	Résultats
Alon et al (1987)	50 Hz	12 séances	Grande variabilité interindividuelle Résultats NS à l'échelle du groupe
Duchateau et al (1988)	100 Hz	20×1s - 10 fois ts les jours – 6 sem	Pas de gain d'endurance MVC=+13 %
Dubowitz et (1982)	6-10 Hz	3 fois 1h par jour 6 sem	↗ 13 % MVC cste
Edwards et al (1988)	10 Hz	3h par jour 6 sem	↗
Hartsell et al (1983)	65 Hz	10×10s, 5fois par sem 6 sem	↗ 13 % MVC=+13 %
Iehl et (1984)	50 Hz	30 min – 3 fois par sem 6 sem	↗ 53 % MVC=+14 %
Kim et al (1995)	1 Hz	1h par jour – 3 fois par sem 4 sem	↗ 82 % MVC cste
Rutherford et al (1988)	10 Hz	3h par jour – 6 fois par sem 6 sem	↗ MVC cste
Scott et al (1985)	5-10 Hz	3 fois 1h par jour 6 sem	↗ MVC cste
Thierault et al (1994)	8 Hz	8h par jour – 6 fois par sem 8 sem	↗

Entraînement à l'endurance

- ✱ Stimulation 8 Hz, 3h par jour, 6jours/sem, 6 semaines, sur 20 sujets sédentaires
- ✱ Tests de fatigues + biopsies
- ✱ Comparaison avant/après
- ✱ Comparaison avec sujets actifs et compétiteurs niveau national entraînés en endurance

Thierault et al (1996)



Entraînement à l'endurance

- ✱ Masse musculaire non affectée
- ✱ Amélioration de la résistance à la fatigue
 - Niveau similaire à celui des sujets actifs
- ✱ Biopsies
 - Diminution du nombre de fibres IIb
 - Augmentation du nombre de fibres IIa et de leur capillarisation
 - Caractéristiques similaires aux sujets actifs
- ✱ Effet comparable à un entraînement en endurance classique

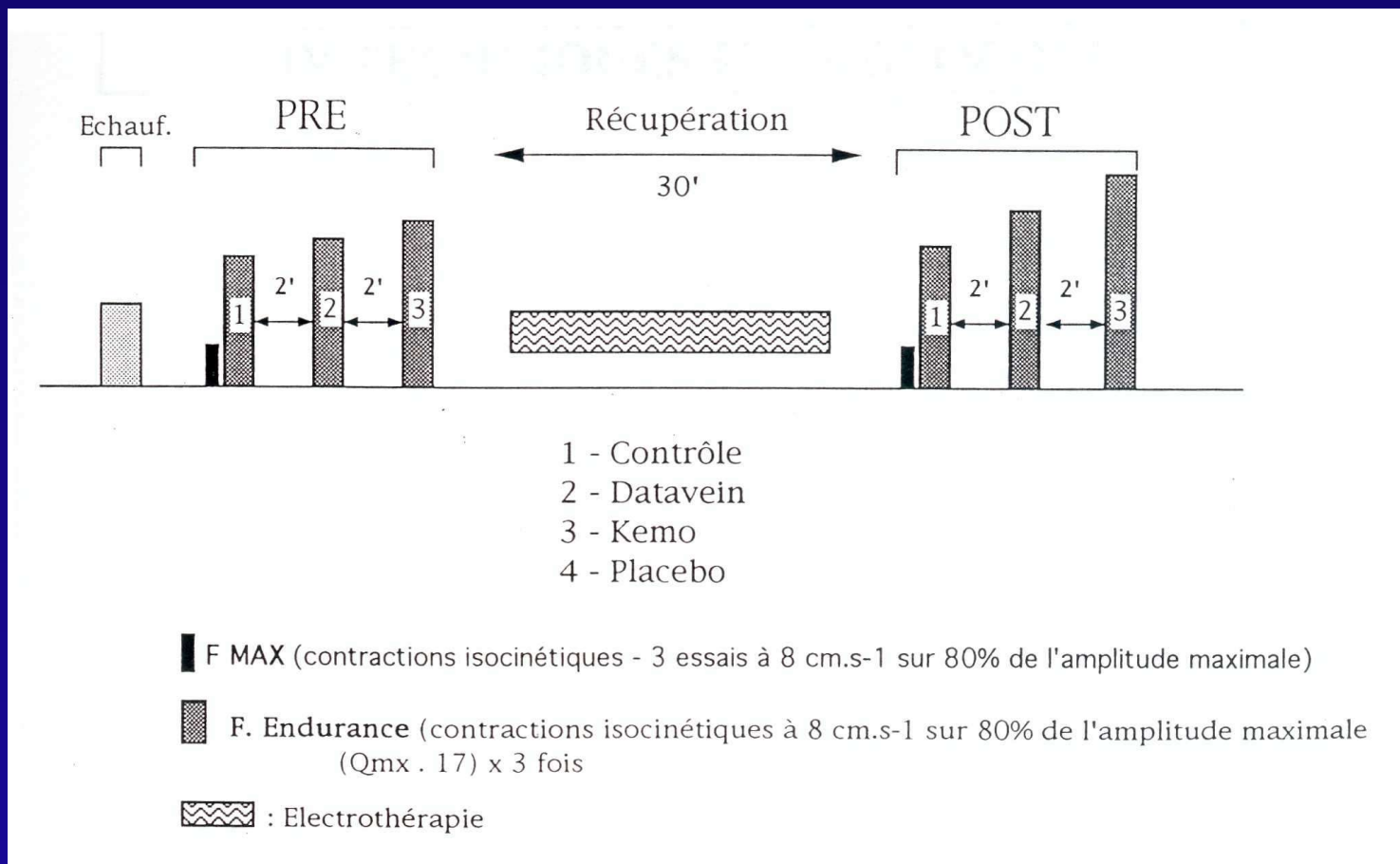
Récupération

- ✱ Maitre (00)
- ✱ Protocole de fatigue: 5 fois 10 répétitions à 80% MVC, sur presse inclinée, 3 min récup
 - 1 groupe récup passive entre les séries
 - 1 groupe récup active, ES 5 Hz
- ✱ Pas de différence de lactatémie pour les 2 groupes
- ✱ Diminution moindre de puissance et du signal EMG pour le groupe stimulé

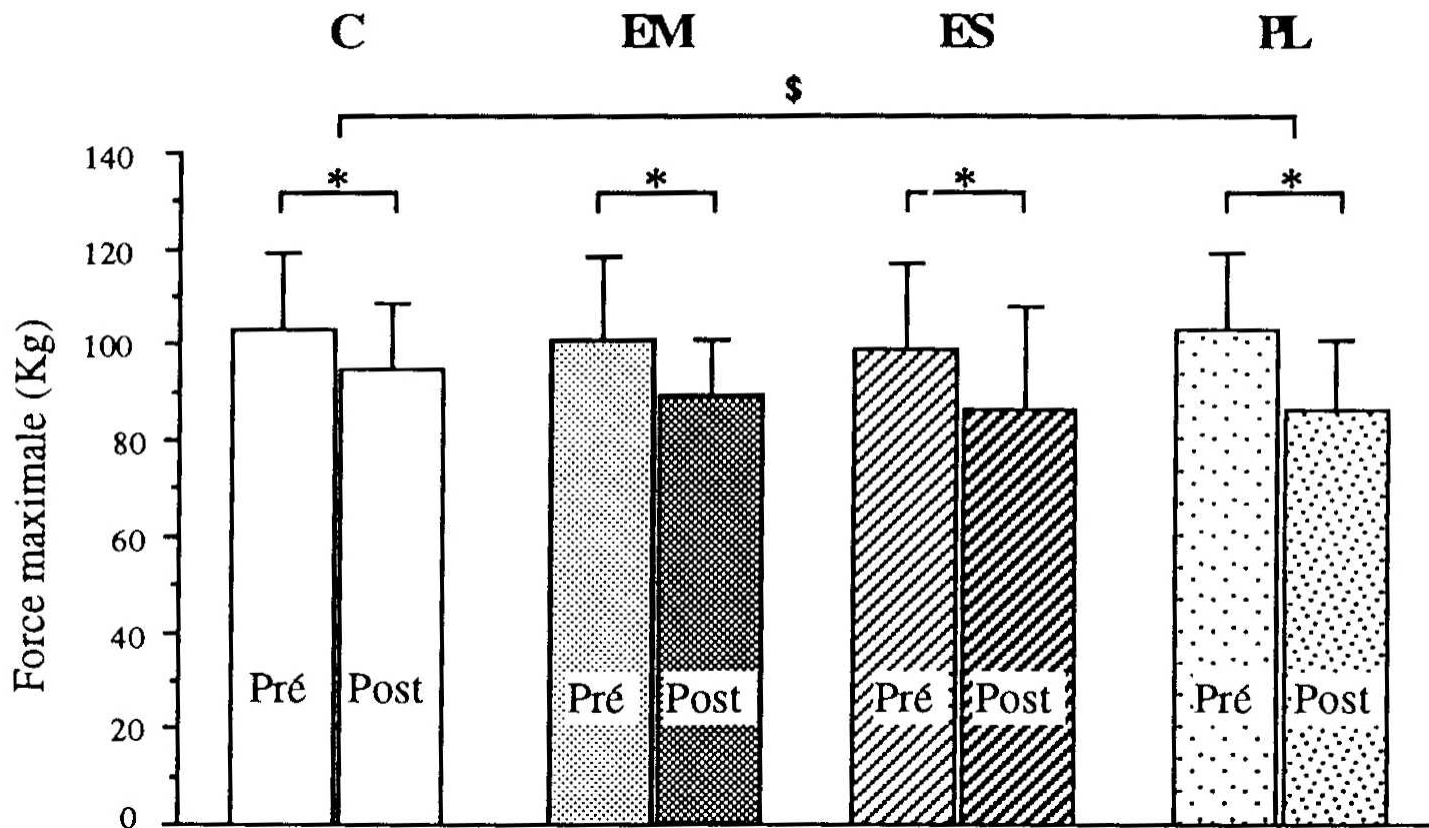
Récupération

✻ Morth (97)

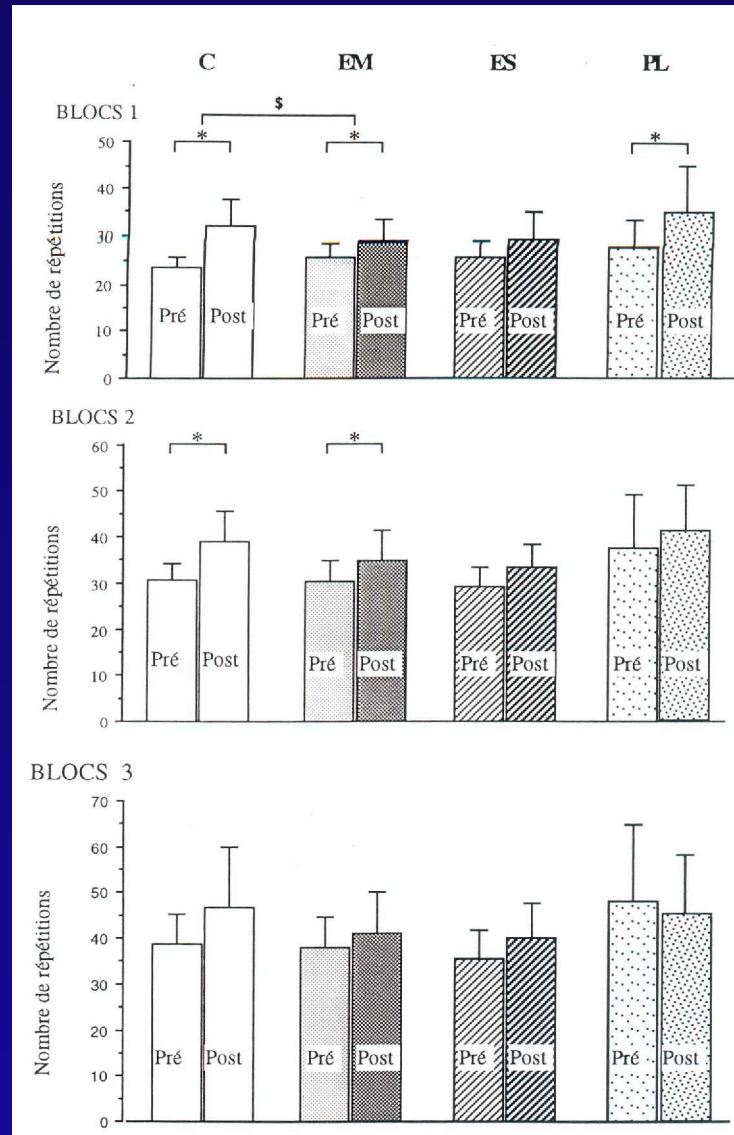
➤ 9 sujet, muscles extenseurs de la cheville



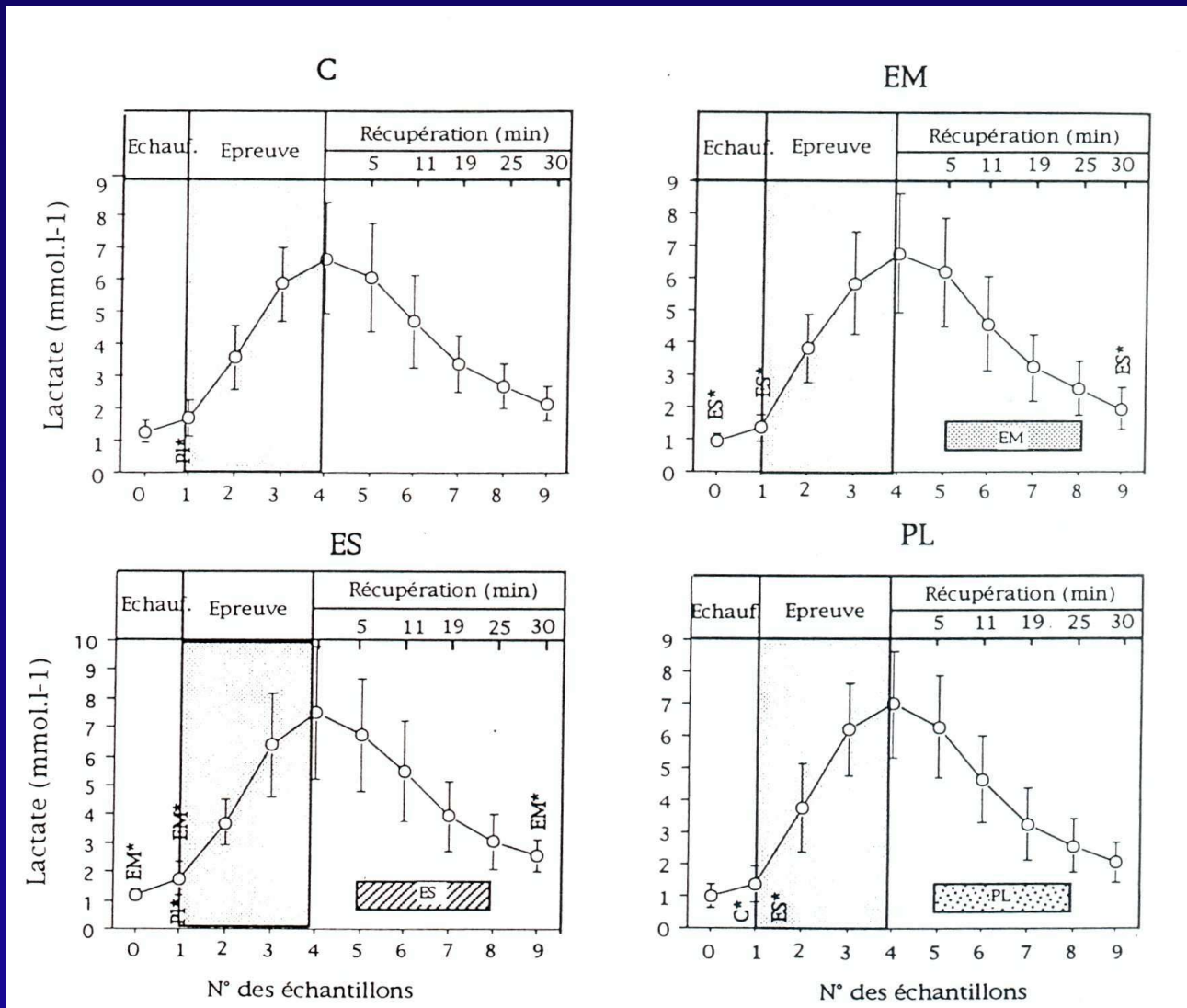
Récupération



Récupération



Récupération



Rééducation post-traumatique

- ✿ Vanderthommen (92)
- ✿ Renforcement du quadriceps après arthroscopie, 16 sujets
 - Rééducation classique par CV
 - Rééducation CV + ES: 40 Hz, 7s-7s, 20 min
- ✿ Test MVC avant l'opération et après la période de rééducation
- ✿ CV: baisse MVC de 15%
- ✿ CV + ES: pas de différence

Rééducation post-traumatique

- ✱ Wigerstad-Lossing (88)
- ✱ Renforcement du quadriceps après ligamentoplastie du croisé antérieur, 23 sujets
 - Rééducation classique CV
 - Rééducation CV + ES, 30 Hz, 6s-10s, 40 min
- ✱ Tests avant l'opération et après la période de rééducation

	CV	CV + ES
MVC	-59 %	-35 %
Section transversale du quadriceps	Diminution	NS
Surface relative occupée par les fibres I	Diminution	NS
Activité enzymatique oxydative et glycolitique	Diminution	NS

Conclusion

- ✱ Efficacité de cette technique ? OUI
- ✱ Comparaison avec l'entraînement par CV
 - Amélioration de la force
 - Comparaison des gains En faveur de CV
 - Rentabilité de l'entraînement Équivalente
 - Processus adaptatifs
 - Nature (neurologique ou musculaire) Similaire à CV
 - Entraînement à l'endurance Similaire à CV
- ✱ Récupération ?
- ✱ Rééducation OUI

Intérêt de l'électrostimulation

✱ Force maximale

- Test motivation ou fatigue lors de MVC
- Activation sélective
- Variation du type d'entraînement

✱ Rééducation

- Très bon moyen pour limiter les pertes de capacités et de performance

✱ Cas des SCI

- Limitation de l'amyotrophie
- Limitation des transformations I → II

Limites de l'électrostimulation

✿ Force maximale

- Nécessité de stimulation quasi-maximale (douleur)
- Activation sélective (importance de la coordination)

✿ Entraînement en endurance

- Durée des séances

✿ Récupération

- Etudes supplémentaires nécessaires

Merci de votre attention

Antoine COUTURIER

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

INSEP

11, Av. du Tremblay

75012 Paris

antoine.couturier@insep.fr